

Securement of frequency assignment for in-orbit demonstration of SSPS¹

Kozo Hashimoto (The Paleological Association of Japan, Inc.)

Daisuke Joudoi and Susumu Sasaki (JAXA)

Abstract

In-orbit demonstrations of Solar Power Satellite Systems are essential for the realization of SSPS after their ground demonstrations. We plan to use microwave to transmit energy to the ground in the demonstration. Its frequency has not yet allocated for the demonstration. Even the microwave power transmission has not yet been an internationally acknowledged service. A frequency can be assigned if a station, when using such a frequency assignment, shall not cause harmful interference to existing services (Radio Regulations 4.4).

Main purposes of the in-orbit demonstration are verification of the correct beam control of microwave transmitted from the orbit and examination of nonlinear interactions in the ionosphere. A basic semiconductor transmission module is 80cm square and consists of 25x25 elements of active integrated antennas. Its total output power is about 1kW. A small satellite experiment uses four modules with an output of 3.84kW and mission weight of 200kg. If we can use 'KIBO' on ISS, we can use nine modules with 8.64kW and 500kg. The duration of the maximum power operation is only 16 sec above the reception site. The estimated power flux densities (pfd) on the ground are 21-26 μ W/m² depending on assigned frequencies for the former and 105-134 μ W/m² for the latter. The density near the transmitter is 1500W/m² at the maximum. Such a high power density similar to that of SSPS is necessary for the examination of nonlinear interactions.

We have selected two candidate frequencies of 5.75GHz in the ISM band and 5.10GHz considering antenna sizes, availability, rain attenuation, interferences, etc. Based on the previous examination of co-existence with other services for the ISM bands, we examined interferences by 5.75GHz. It was found that the second harmonics interfere with space-to-earth communications where the pfd limitations exist. We hope a frequency will be allocated since our operation time is very short.

¹ Presented at the Thirteenth SPS Symposium, 28-29 October, 2010

SSPS の軌道上実証のための周波数確保について*

橋本弘藏（古代學協會）

上土井大助、佐々木進（JAXA）

1. はじめに

無線電力伝送や SSPS の地上実証に続いて軌道上実証を行う必要がある。無線電力伝送は未だ国際的に認められた用途ではなく、使用する周波数は既存の業務に有害な干渉を生じないことを示すことを条件に、国際的な調整が必要である(無線通信規則 RR 4.4 条)。そこで、我々は漠然と周波数帯を指定するのではなく、具体的に候補の周波数を指定して、総務省と周波数確保のための打ち合わせを開始した。前提とした実験モデル、候補周波数の選定および共用検討の概要について述べる。

2. 軌道上実証のモデル

軌道上実証のモデルは USEF で検討されてきたものを基本としており、目的は以下のとおりである。

主目的

- (1) マイクロ波ビーム制御能力実証（軌道上のアンテナからのマイクロ波ビームが地上からのパイロット信号に追従する能力の実証）
- (2) マイクロ波の電離層通過実証（電離層との非線形相互作用の解明）

副目的

- (3) マイクロ波送受電の電力効率評価（実験と解析）
- (4) 不要波の抑圧レベル評価（既存の通信インフラに対する電磁適合性の実証）

基本となる半導体送電モジュールは、アンテナと出力 1.7-0.6W の送電回路が一体となったアクティブ集積アンテナ（AIA）25x25 素子からなり、1050-350W の出力で 80cm 角である。周波数は 5GHz 帯を想定している。送電系の仕様を表 1 に示す。3 軸制御の小型衛星で実証する場合は、ミッション重量 200kg で、このモジュール 4 枚を使用し、出力は 3.84kW となる。「きぼう」で実施する場合は、ミッション重量 500kg でモジュール 9 枚を使用し、出力は 8.64kW となる。地上での電力束密度は、周波数に依るが、前者で 21-26 μ W/m²、後者の場合 105-134 μ W/m²となる。

* 第 13 回 SSPS シンポジウム，日本大学にて 2010 年 10 月 28,29 日開催

表1 マイクロ波送電系の主な仕様

	小型衛星	「きぼう」
想定シヨウ重量	200kg	500kg
送電パネル	0.8mx0.8mx(0.02- 0.1)m 4 枚	0.8mx0.8mx(0.02- 0.1)m 9 枚
その他のミッション機器	・制御・電源部 ・観測機器（プラズマ計測器、電子エネルギー分析器、波動受信機）	
送電電力規模	3.84kW（電波型式：NON）	8.64kW（電波型式：NON）
姿勢制御	衛星本体の3軸制御	パネル面の90度回転制御
姿勢制御精度	±1°以内	
マイクロ波ビーム制御	搭載CPU制御及び地上からのパイロット信号によるレトロディレクティブ方式	
軌道	370kmの準回帰軌道	ステーション軌道
平均電力密度	地上（最大）：26μW/m ²	地上（最大）：134μW/m ²
	アンテナ部（最大）1500W/m ²	

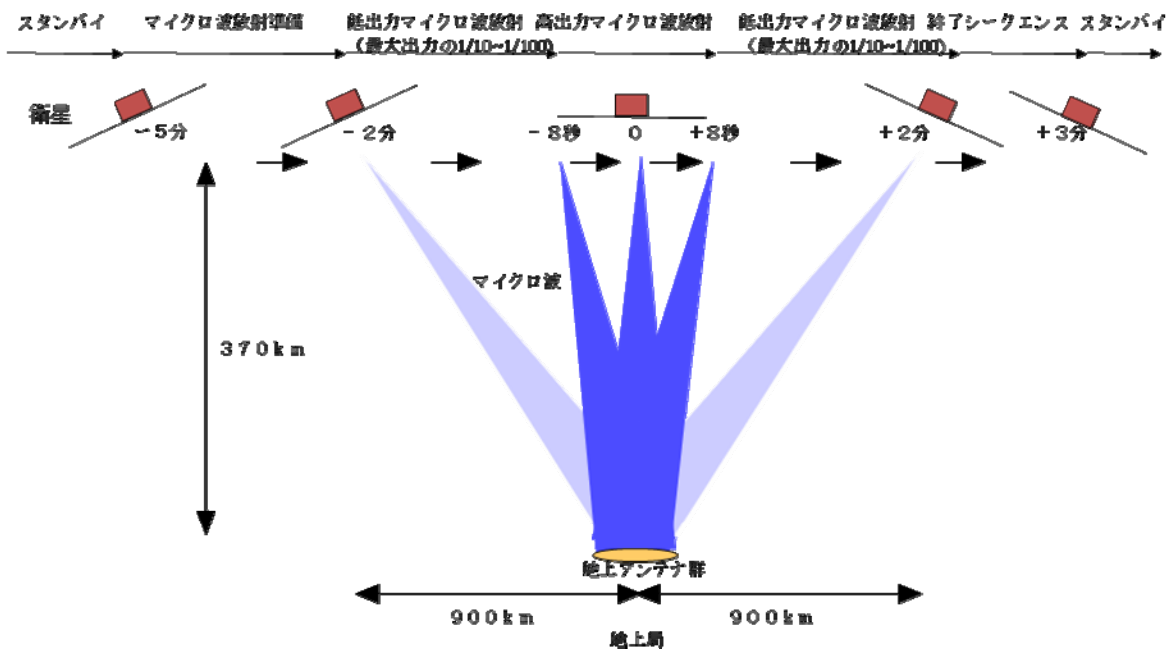


図1 地上局への放射実験シーケンス

表 2 5GHz 帯の利用状況

周波数 MHz		日本	欧州	米国		
4900-5000		無線 LAN (屋外)				
5000-5030	マイクロ波着陸 方(MLS) 5100		GALILEO			
5030-5091		無線 LAN (屋外)				
5091-5150			移動衛星			
5150-5250	航空無線航行	無線 LAN (屋内)	移動衛星	HIPERLAN	無線 LAN	
5250-5350		地球探査衛星 気象レーダー		HIPERLAN	無線 LAN	
5350-5470		各種レーダー				
5470-5725				HIPERLAN		
5725-5850	ISM バンド 5750	5770-5850 ETC/DSRC	ETC/ DSRC	HIPERLAN	無線 LAN	
5850-5875		放送事業者の TV 番組中継				DSRC
5875-5925						

地上への放射実験の概要を図 1 に示す。アンテナ面が受信点である地上局に向くように姿勢を制御し、レトロディレクティブシステムを用いてビームが到来方向に向く性能を評価する。真上を通る前後それぞれ 2 分程度低出力で実験を行い、真上の前後それぞれ 8 秒だけ最大出力とする。電離層の通過実証の場合は、同様の運用時間で、アンテナ面を衛星の進行方向に向け電波を放射する。現在の出力では、アンテナの近傍で電力密度が最大 $1500\text{W}/\text{m}^2$ となり、実際の SSPS の $1000\text{W}/\text{m}^2$ に近い値で、電離層で非線形相互作用が起こって、問題になる損失、密度変動など、電離層やマイクロ波に影響がないことを実証する。衛星近傍の環境の評価方法も検討しておく必要がある。

3. 実験候補周波数の選定

アンテナ系を小さくするためには周波数が高い方が良いが、降雨減衰の影響を避けるために 6GHz 以下が望ましい。そこで 5GHz 帯について考える。現在の利用状況を表 2 に示す。また、高調波が電波天文に割り当てられた周波数と重複しない周波数は 5000-5117, 5133-5217, 5438-5525, 5625-5900 MHz である。先ず 5725-5875MHz の ISM バンドについて考える。5850MHz より上は、放送中継 (FPU) に割り当てられており、優先度も高い。5770-5850MHz は、10MHz 間隔で DSRC に割り当てられており、ISM 帯に隣接した 5470-5725MHz が、802.11a、11n の無線 LAN に割り当てられた。以上より、我々が調査した範囲では、5725-5760MHz は割り当てがないと考えられるため、5750MHz を第 1 候補とする。

次に ISM バンド以外について考える。5000-5150MHz は、マイクロ波着陸方式

(MLS) 用として確保されているが、GPS の普及により、当面割り当て予定はない。そのうち 5030-5091MHz は、5GHz 帯無線アクセスシステムに割り当てられた。以上より、我々が調査した範囲では、5100-5150MHz は割り当てがないと考えられるため、5100MHz を第 2 候補とする。

4. 周波数の共用検討

以前行われた共用検討[1]を参考に 5.75GHz について検討する。5.1GHz は、5.75GHz の使用が困難な場合に、共用検討を行う予定である。最も関係があるのは DSRC に含まれる ETC である。DSRC について ARIB 標準規格 STD-T75 で規定された干渉耐性のうち、スプリアス・レスポンス・リジェクション (SRR) が対象となる。SRR の規定によれば、SRR は妨害波レベルと規格感度+3dB (-57dBm) の比となっており、参考値として下記の通り規定される。

ISM 帯域内 (5.725GHz-5.875GHz) : 24dB 以上 (-33dBm 以上)

ISM 帯域外 (上記外) : 18dB 以上 (-39dBm 以上)

DSRC の許容干渉レベル (PFD) は、 $230\mu\text{W}/\text{m}^2$ であり、本実験の PFD は最大 $134\mu\text{W}/\text{m}^2$ であるため、干渉の問題はない。第 2 高調波が宇宙—地上間通信に割り当てられた周波数帯域と重なる部分がある。宇宙—地上間通信は 10.7~11.7GHz 及び 11.7~12.5GHz であり、5.75GHz の第 2 次高調波(11.5GHz)が重複している。宇宙—地上間通信のコンパチビリティ条件(pfd 制限値)は表 3 の通りである。

表 3 宇宙—地上間通信の電力束密度 pfd 制限値 (dBW/m²/4kHz)

到達角 d	0-5°	5-25°	25-90°
10.7~11.7GHz	-150	-150+0.5(d-5)	-140

地上における最大電力束密度は、「きぼう」での 9 枚パネルの場合、基本波で $134\mu\text{W}/\text{m}^2=-38.7\text{dBW}/\text{m}^2$ である。スプリアスが-50dB の場合で高調波も同じアンテナ利得なら-88.7dBW/m² となり、移相器の位相がランダムで利得を 1 でできた場合においても、-133.0dBW/m² になり、制限を超える。以前の報告書[1]では搬送波に 1MHz の帯域があるとして、4kHz 帯域の pfd ということで、26dB 低下させていた。

他衛星への影響に関しては、EMC 基準 (電界・放射干渉感受性限界の規格) として、MIL-STD-461C part3 RS03 を適用して計算すると、最悪ケース (周波数 5.75GHz、送信電力 8.64kW) で、16.6km まで接近すると影響があるという結果になるが、この距離まで接近するのは非常に稀であると考えられる。

我が国の電波防護指針によれば、一般人に対する 1.5GHz 以上の遠方界曝露の上限指針値は $10\text{W}/\text{m}^2$ となっている。今回の軌道上実証については、地上最大電力密度は $100\mu\text{W}/\text{m}^2$ 程度で、上限指針値に比べ、はるかに小さいため、人体への影響はない。

5. まとめ

候補周波数の 5.75GHz は、基本的には干渉問題はないと考えられる。第 2 高調波は PFD 規制のある周波数なので、厳しい。帯域幅を広げるとか、高調波に対して無指向性にできると何とか回避できる。運用が短時間であることで認められることを期待している。技術的には、フェーズドアレイの第 2 高調波に対する利得は下げられるか、高調波に対する移相器の位相は、どの程度ランダムにできるのかといった問題がある。

参考文献

- [1] 周波数干渉問題検討委員会, マイクロ波送電の周波数の共用検討について, SSPS 検討委員会, JAXA, 2004.